凹唇壁蜂为油菜授粉的行为特征及经济价值评估*

刘 丽[1, 2**] 欧阳芳[3] 李丽莉[1] 曲诚怀[4] 李 超[1]
于 毅[1] 郑 礼[1] 叶保华[2] 门兴元[1***]

（1. 山东省农业科学院植物保护研究所，山东省植物病毒学重点实验室，济南 250100；2. 山东农业大学植物保护学院，泰安 271018；3. 中国科学院动物研究所，北京 100101；4. 牟平农业局植保站，烟台 264100）

摘 要 **【目的】** 凹唇壁蜂 *Osmia excavata* Alfken 是近年来被迅速应用的一种传粉昆虫。明确凹唇壁蜂对油菜的授粉行为、授粉效果，评估凹唇壁蜂对油菜的授粉功能量及经济服务价值，有利于加深社会对凹唇壁蜂的认知并促进其在油菜上的推广应用。**【方法】** 在油菜田内，于油菜开花前，把油菜区域划定为凹唇壁蜂授粉区、隔离授粉区两个区域，实验过程中用摄像机记录凹唇壁蜂授粉行为和效果。采用蜜蜂依存度市场估价法，结合我国国情，评估 2015 年间油菜凹唇壁蜂授粉的经济价值，并探索凹唇壁蜂对油菜生产的重要性。**【结果】** 60%以上的凹唇壁蜂在上午 7:00 到 8:00 出巢，下午 4:30 到 5:30 归巢，日出巢活动时间约 9.58 h。凹唇壁蜂在每朵花上平均停留时间达 10.89 s。凹唇壁蜂授粉区在单角果鲜重、结角果率、单角果籽粒数上比隔离授粉区分别提高 2.74%、4.81%、11.48%。结合 2015 年数据，计算得出凹唇壁蜂对我国各省份油菜的授粉功能量超过 373.3 万吨，授粉服务总价值超过 194.102 亿元，从凹唇壁蜂授粉功能量和服务价值来看，凹唇壁蜂具有极大的生态价值、经济价值。**【结论】** 凹唇壁蜂具有传粉优势，组织凹唇壁蜂在油菜花期进行辅助授粉，是提高油菜产量的一条重要途径，对提高油菜产生的经济效益具有积极的作用。凹唇壁蜂授粉是应该得到重视的生产投入，应当提高民众对凹唇壁蜂授粉价值的认知度。

关键词 油菜，凹唇壁蜂，授粉行为，增产，经济价值

Economic value of the pollination services provided by *Osmia excavata* Alfken to rape seed crops

LIU Li[1, 2**] OUYANG Fang[3] LI Li-Li[1] QU Cheng-Huai[4] LI Chao[1]
YU Yi[1] ZHENG Li[1] YE Bao-Hua[2] MEN Xing-Yuan[1***]

(1. Institute of Plant Protection, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Shandong Provincial Key Laboratory of Plant Virology, Jinan 250100, China; 2. College of Plant Protection, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China; 3. Institute of Zoology, Chineses Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. Plant protection station of Muping Agricultural Bureau, Yantai 264100, China)

Abstract **[Objectives]** To improve understanding of the economic benefit of the pollination of rape crops by the Mason bee *Osmia excavata* Alfken, an important pollinating insect. **[Methods]** Rape fields were divided into two areas, an *O. excavata* pollination treatment area and an *O. excavata* exclusion area, before flowering. Cameras were used to record the process and effect of *O. excavata* pollination on rape plants. Based on the honey bee dependent market valuation method and China's national conditions, we evaluated the economic value of *O. excavata* pollination of rape in 2015, and explored its importance for rape production. **[Results]** More than 60% of bees left their nests from 7 to 8 a.m. and returned between 4:30 and 5:30

*资助项目 Supported projects：山东省现代农业产业技术体系蜂产业创新团队

**第一作者 First author，E-mail：18706381696@163.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：menxy2000@hotmail.com

收稿日期 Received：2018-10-22，接受日期 Accepted：2018-11-12

p.m; an active period of about 9.58 h.The average duration of visits to each flower was 10.89 s.The pollination area had 2.74%, 4.81% and 11.48% higher seed weight,silique ratio and grain number, respectively, than the exclusion area. Based on the 2015 data, the amount of rape seed attributed to pollination by *O. excavata* in China is estimated to exceed 3.733 million tons with a total pollination service value of more than 194.102×10^8 yuan. **[Conclusion]** Pollination of rape by *O. excavata* has important economic benefits and it is therefore important to find ways to protect *O. excavata* populations and enhance the pollination activity of this species during the rape flowering period. Public awareness of the economic benefit provided by *O. excavata* should be improved.

Key words　rape, *Osmia excavata* Alfken, pollinating behavior,increase yield, economic value

油菜 *Brassica campestris* L.属于十字花科芸薹属，是我国重要的油料作物，也是我国南方春冬季和北方夏季主要的蜜源植物（周丹银等，2010）。油菜在我国南北方均有种植，除用作榨取食用油和饲料之外，还可用于冶金、化工、机械、橡胶、纺织、油漆、制皂、造纸、医药等方面，具有重要的经济价值。

在开花植物中，大约 65%为虫媒花，虫媒花的繁殖和种群延续需要媒介昆虫的传粉作用。蜜蜂是自然界众多植物能得以延续的重要使者。凹唇壁蜂 *Osmia excavata* Alfken 属于蜜蜂总科（Apoidea）切叶蜂科（Megachilidae)的壁蜂属（*Osmia*)的一种，比蜜蜂（Apidae）耐低温、授粉效率高、管理简便、应用成本低，近年来被迅速应用于为水果、蔬菜等作物传粉（曹衍斌等，2017）。我国农业增产大量依靠化肥、农药、生长素，寻找新的增产措施是当务之急，授粉是农业生产中的一个重要投入要素，但野生授粉资源已经无法满足生产的需要（李海燕，2012），故对蜂类的认识和应用就显得更为重要。目前，有关蜜蜂对油菜的授粉情况已有报道，但关于凹唇壁蜂对油菜的授粉行为和授粉效果的具体报道相对较少。凹唇壁蜂是我国本地的优异传粉昆虫，20 世纪 90 年代被发掘，首先被应用于为北方苹果授粉，替代了人工授粉，大大降低了果品生产成本，提高了果品质量（周伟儒，2002），目前也被大量应用于甘蓝、油菜等蔬菜授粉，但是传粉凹唇壁蜂授粉所带来的经济效益、社会效益和生态效益，尚未引起足够的重视。与蜜蜂授粉业发达的国家相比，我国的昆虫授粉价值评估工作刚刚起步，价值评估体系尚未建立（刘朋飞等，2011）。而开展农业生态系统中昆虫授粉功能量与服务价值评估，是保护与利用授粉昆虫、发挥其授粉服务功能的重要基础。因此本文通过田间试验观测了凹唇壁蜂对油菜授粉的行为，测定了授粉增产效果，并借鉴国外成熟的昆虫授粉价值评估方法评价了我国凹唇壁蜂为油菜授粉的潜在增产经济价值。

1　材料与方法

1.1　供试凹唇壁蜂

凹唇壁蜂由山东省农业科学院植物保护研究所在栖霞市苹果基地繁育。选择饱满、大小均匀一致的雌蜂、雄蜂蜂茧备用。

1.2　试验田概况

于 2018 年 4 月份在山东省烟台市牟平区增富山家庭农场的油菜田进行凹唇壁蜂授粉研究。油菜在 2017 年秋季种植，采用常规水、肥管理，没有施用化学农药。

1.3　研究方法

设置两个处理，分别为隔离授粉和凹唇壁蜂授粉，每个处理设 3 个重复小区，每个小区面积约为 20 m^2。隔离授粉处理，在油菜开花前用 60 目白色防虫网罩住，网高 1.5 m，罩网后清除网罩内的昆虫并封闭阻止其他授粉昆虫进入网罩内；凹唇壁蜂授粉处理，加罩网、清除网罩内的授粉昆虫处理与隔离授粉一致，在油菜始花期在每个网罩内 1 m 高的位置架设壁蜂蜂巢，蜂巢内放置 50 塑料蜂管，然后在每个蜂巢分别放置凹唇壁蜂雌蜂蜂茧和雄蜂蜂茧 30 头、15 头。

1.3.1 凹唇壁蜂授粉行为观察 在网罩内安装有自动存储功能的数码摄像机观察凹唇壁蜂的行为，摄像机分别对准壁蜂蜂巢和油菜花序，24 h 持续录像，直到油菜花期结束。

对收回的摄像机数据读取分析，统计凹唇壁蜂行为数据，包括壁蜂出巢、回巢、访花等数据。

1.3.2 凹唇壁蜂对油菜授粉增产作用测定 在每个小区随机每区组随机选取 15 株油菜，调查花朵数量，落花后，计数单角果籽粒数，测定单角果重量，计算结角果率。

$$\text{结角果率}(\%)=\frac{\text{结角果的数量}}{\text{开花总量}}\times 100\text{，}$$

$$S=\frac{P-P_0}{P_0}\times 100\%\text{。}$$

其中，S：壁蜂授粉提高的百分率；P：壁蜂授粉处理的结角果率；P_0：隔离授粉处理的结角果率的数值。

1.3.3 数据统计分析 采用 SPSS 20.0 软件对数据进行统计分析。使用 Excel 2007 绘制图表。

1.4 凹唇壁蜂对油菜授粉功能量

通过评价凹唇壁蜂对油菜的授粉功能量，可以了解凹唇壁蜂对油菜产量的生物学和生态学效应，也可以反映出油菜对凹唇壁蜂授粉的需求量情况。凹唇壁蜂授粉功能量越大，往往生产中对凹唇壁蜂的需要越大。目前，我国蜜蜂授粉价值的定量化研究处于起步阶段，故借鉴 Morse 和 Calderone（2000）估算蜜蜂授粉对农业价值的方法（2000），并结合我国国情，基于 2015 年全国油菜种植统计数据来计算我国各省份油菜生产上凹唇壁蜂传粉功能的功能量、服务价值。

a. 授粉依赖程度：

$$D_{\mathrm{i}}=\frac{Yield_{\mathrm{i,open}}-Yield_{\mathrm{i,closed}}}{Yield_{\mathrm{i,open}}}\times 100\%$$

D_{i}(Dependence on insect pollination)：为农作物 i 对昆虫授粉的依赖程度，或授粉昆虫对作物的增产效果；$Yield_{\mathrm{i,open}}$：在开放的或者昆虫自由授粉的区域中农作物 i 的产量；

$Yield_{\mathrm{i,closed}}$：在控制的或者避免昆虫授粉的区域中农作物 i 的产量。

b. 驯养昆虫授粉的功能量估算方法：

$$PF_{\mathrm{dp}}=\sum\nolimits_i(Y_{\mathrm{i}}\times D_{\mathrm{i}}\times P_{\mathrm{i}})$$

PF_{dp} (Pollination function of domesticated pollinators)：驯养昆虫对各类虫媒传粉作物实物产量的贡献之和；Y_{i} (Yield of crop)： 第 i 种作物的实物产量；D_{i} (Dependence on insect pollination)：第 i 种作物对昆虫授粉的依赖程度；P_{i} (Proportion of pollinators that are domesticated pollinators)： 驯养授粉昆虫在第 i 种作物的有效昆虫传粉者中的比例估计值。

1.5 凹唇壁蜂对油菜的授粉服务价值评估

通过评估凹唇壁蜂对油菜的授粉服务价值，可以掌握壁蜂授粉产生的经济效应或经济价值，其目的是在经济角度上权衡是否值得相应的投入来维持或增强授粉，以满足油菜的授粉需求。

驯养授粉昆虫授粉的服务价值估算方法：

$$PF_{\mathrm{dp}}=\sum\nolimits_i(Y_{\mathrm{i}}\times D_{\mathrm{i}}\times P_{\mathrm{i}}\times PR_{\mathrm{i}})$$

PS_{dp} (Value of pollination service by domesticated pollinators)：驯养昆虫对各类虫媒作物产量授粉服务价值的贡献之和；PR_{i} (Price of crop)：第 i 种作物的价格。

2 结果与分析

2.1 凹唇壁蜂对油菜授粉行为

凹唇壁蜂授粉行为数据分析显示：平均每只凹唇壁蜂日活动时长约 9.58 h。7:00-8:00 是凹唇壁蜂首次出巢的高峰期，62.50%的个体在此时间段首次出巢，16:30-17:30 是其末次归巢的高峰期，61.54%个体在此期间末次归巢（表 1）。9:00-10:00、12:00-13:00 是其频繁出巢采集阶段，17:00 之后无蜂出巢活动（图 1）。根据其在巢中停留时间长短可以分为 3 种类型：长停留型（停留时间达 1.64 h）、中停留型（停留时间为 16.21 min）、短停留型（停留时间为 2.58 min），所占比例分别为 30.43%、34.78%、34.78%（表 2）。

表 1　凹唇壁蜂首次出巢和末次归巢时间

Table 1　The first leaving nest time and the last returning nest time of *Osmia excavata*

	首次出巢 The first leaving nest time			末次归巢 The last returning nest time		
时间 Time	6:00-7:00	7:00-8:00	8:00 后 After 8:00	15:30-16:30	16:30-17:30	17:30 后 After 17:30
所占百分率 Percentage	18.75%	62.50%	18.75%	30.77%	61.54%	7.69%

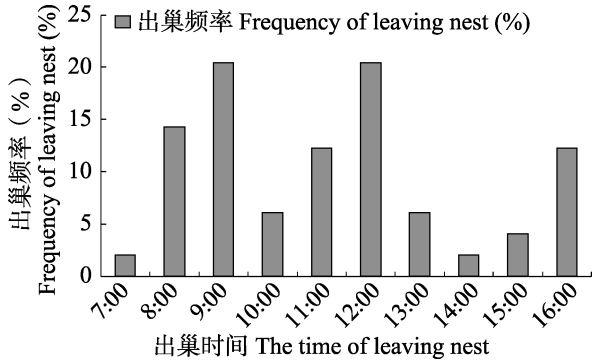

图 1　凹唇壁蜂出巢频率

Fig. 1　Frequency of leaving nest

出巢后凹唇壁蜂对单朵花的访问时间长 2-18 s，平均停留时间为 10.89 s。凹唇壁蜂访花时，首先雌蜂头部弯曲伸向雄蕊吸取花蜜，腹部腹面紧贴雄蕊群，在腹部的运动下，腹毛刷迅速刮刷雄蕊，收集和携带花粉。一只壁蜂在同一花序上连续访问 1.50 朵，而且有花朵被多次访问的现象，每朵花平均被访问 1.25 次（表 3）。

2.2　凹唇壁蜂对油菜授粉增产效果

隔离授粉区和凹唇壁蜂授粉区油菜授粉效果见表 4，凹唇壁蜂授粉区的单角果鲜重、结角果率、单角果籽粒数上比隔离授粉区分别提高 2.74%、4.81%、11.48%。其中，凹唇壁蜂授粉

表 2　凹唇壁蜂在蜂管中停留时间

Table 2　The duration of *Osmia excavata* staying in a plastic pipe

类型 Type	长停留型 Long residence time	中停留型 Medium residence time	短停留型 Short residence time
时长 Time duration	（1.64±0.18）h	（16.21±1.82）min	（2.58±0.58）min
所占百分率 Percentage	30.43%	34.78%	34.78%

表 3　凹唇壁蜂在油菜田活动行为

Table 3　Behavior observation of *Osmia excavata* in the rape field

指标 Index	每日活动时长 Daily activity duration	单朵花停留时间 Residence time in a flower	单只蜂访问一个花序的花数 The number of flowers in a inflorescence visited by a single bee	单朵花被访问次数 The number of visits to a single flower
平均 Average	（9.58±0.11）h	（10.89±3.13）s	（1.50±0.269）朵	（1.25±0.164）次

表 4　不同处理区组凹唇壁蜂为油菜授粉的效果

Table 4　Effect of *Osmia excavata* pollinating of rape in different treatment groups

处理 Treatment	单角果鲜重（mg） The fresh weight of a single silique (mg)	结角果率（%） Silique ratio (%)	每角果粒数 The grain number of per silique
隔离授粉 The isolated pollination	282.33±19.13a	86.03±2.39a	15.51±0.49b
凹唇壁蜂授粉 The *Osmia* pollination	290.07±12.76a	90.17±4.71a	17.29±0.54a
壁蜂授粉提高的百分数 Percentage increase by *Osmia* pollination	2.74%	4.81%	11.48%

表中数据为平均数±标准误，同一列数据后标有不同字母表示不同处理间差异显著（$P<0.05$）（Duncan's 多重比较法）。

Data in the table are represented as mean ± SE, and followed by different letters in the same column indicate significant difference among different treatments by Duncan's multiple range test ($P<0.05$).

区的每角果粒数显著高于隔离授粉区（F=5.930，df =1，P<0.05），而壁蜂授粉区、隔离授粉区在单角果鲜重、结角果率上没有显著差异（F=0.115，df =1，P=0.736；F=0.009，df=1，P=0.926）。

2.3 全国各省凹唇壁蜂对油菜的授粉功能量评估

依据收集的 2015 年全国各主要油菜种植省份的油菜产量和油菜对凹唇壁蜂的依赖程度数据计算了各省凹唇壁蜂对油菜的功能量。授粉功能量越大，对凹唇壁蜂需求量越大。结果显示：从全国各省层面来看，2015 年凹唇壁蜂对油菜的授粉功能量大于 50 万吨的省份有：湖北、四川、湖南；介于 10 万吨到 30 万吨之间的有：安徽、江苏、贵州、河南、江西、云南、重庆、陕西、内蒙古；介于 1 万吨到 10 万吨之间的有：甘肃、青海、浙江、新疆、西藏；低于 1 万吨的有河北、广西、山东、福建、上海、广东、山西、辽宁、宁夏、天津（表 5）。

表 5 凹唇壁蜂授粉功能量各省排序

Table 5 Pollination function of *Osmia excavata* in different provinces

省份 Province	油菜授粉功能量（万吨） Rape pollination function (ten thousand tons)	省份 Province	油菜授粉功能量（万吨） Rape pollination function (ten thousand tons)	省份 Province	油菜授粉功能量（万吨） Rape pollination function (ten thousand tons)
湖北 Hubei	63.797 5	重庆 Chongqing	11.682 5	广西 Guangxi	0.655 0
四川 Sichuan	59.632 5	陕西 Shaanxi	10.797 5	山东 Shandong	0.610 0
湖南 Hunan	52.702 5	内蒙古 Inner Mongolia	10.437 5	福建 Fujian	0.470 0
安徽 Anhui	31.572 5	甘肃 Gansu	8.492 5	上海 Shanghai	0.240 0
江苏 Jiangsu	26.585 0	青海 Qinghai	7.515 0	广东 Guangdong	0.212 1
贵州 Guizhou	22.257 5	浙江 Zhejiang	6.280 0	山西 Shanxi	0.167 1
河南 Henan	21.525 0	新疆 Sinkiang	2.697 5	辽宁 Liaoning	0.055 0
江西 Jiangxi	18.485 0	西藏 Tibet	1.592 5	宁夏 Ningxia	0.047 5
云南 Yunnan	14.017 5	河北 Hebei	0.740 0	天津 Tianjin	0.002 5

2.4 全国各省凹唇壁蜂对油菜的授粉服务价值评估

在分析凹唇壁蜂对油菜授粉功能量的基础上，考虑油菜市场价格，计算了 2015 年凹唇壁蜂对我国油菜的授粉服务价值。结果显示：从全国各省层面来看，与功能量的变化趋势相同，2015 年凹唇壁蜂对油菜的授粉服务价值大于 25 亿元的有：湖北、四川、湖南；介于 10 亿至 20 亿之间的有：安徽、江苏、贵州、河南；介于 1 亿至 10 亿的有：江西、云南、重庆、陕西、内蒙古、甘肃、青海、浙江、新疆；低于 1 亿的有：西藏、河北、广西、山东、福建、上海、广东、山西、辽宁、宁夏、天津（表 6）。

3 讨论

世界上主要农作物中 85%都依赖于蜜蜂等昆虫授粉（Klein *et al.*，2007；Ollerton *et al.*，2011）。在农业生产中采用蜂授粉可以使授粉充分、受精完全、提高果品、增加农作物产量，使植物的生长进入兴奋状态（郭媛等，2008）。相对于蜜蜂的授粉功能，凹唇壁蜂有更大的优势，具有耐低温、活动时间早、活动时间长、授粉效率高的优点。

掌握凹唇壁蜂采集和访花行为，是充分发挥其传粉增产功能的基础。凹唇壁蜂大多在上午 7:00 到 8:00 出巢，下午 4:30 到 5:30 陆续归巢，出巢活动时间约为 9.58 h，出巢活动时间和归巢

表 6　凹唇壁蜂授粉服务价值各省排序

Table 6　Value of pollination services of osmia in different provinces

省份 Province	授粉服务价值（亿元）Value of pollination service (hundred million yuan)	省份 Province	授粉服务价值（亿元）Value of pollination service (hundred million yuan)	省份 Province	授粉服务价值（亿元）Value of pollination service (hundred million yuan)
湖北 Hubei	33.174 7	重庆 Chongqing	6.074 9	广西 Guangxi	0.340 6
四川 Sichuan	31.008 9	陕西 Shaanxi	5.614 7	山东 Shandong	0.317 2
湖南 Hunan	27.405 3	内蒙古 Inner Mongolia	5.427 5	福建 Fujian	0.244 4
安徽 Anhui	16.417 7	甘肃 Gansu	4.416 1	上海 Shanghai	0.124 8
江苏 Jiangsu	13.824 2	青海 Qinghai	3.907 8	广东 Guangdong	0.110 5
贵州 Guizhou	11.573 9	浙江 Zhejiang	3.265 6	山西 Shanxi	0.087 1
河南 Henan	11.193 0	新疆 Sinkiang	1.402 7	辽宁 Liaoning	0.028 6
江西 Jiangxi	9.612 2	西藏 Tibet	0.828 1	宁夏 Ningxia	0.024 7
云南 Yunnan	7.289 1	河北 Hebei	0.386 1	天津 Tianjin	0.001 3

时间均比角额壁蜂早（Matsumoto and Maejima，2010）。凹唇壁蜂在每朵花上平均停留时间达 10.89 s，由于没有发现蜜蜂等对油菜授粉行为研究报道，与杨佳林（2015）等研究蜜蜂对草莓的授粉行为及效果的结果相比，凹唇壁蜂在每朵花上的停留时间（10.89 s）大于地熊蜂 *Bombus terrestris*（10.00 s）和意大利蜂 *Apis mellifera*（6.00 s）在花上的停留时间（杨佳林等，2015）。此外，不同于地熊蜂和意大利蜂的授粉方式，凹唇壁蜂授粉时，雌蜂头部弯曲伸向雄蕊吸取花蜜，腹部腹面紧贴雄蕊群，在腹部的运动下，腹毛刷迅速刮刷雄蕊，从而收集和携带花粉，可能让油菜更好授粉。另外我们也发现，被凹唇壁蜂访过之后的花朵仍会被访问，且存在一只壁蜂在同一花序上连续访问多朵花的现象，这可能是凹唇壁蜂授粉充分、植株受精完全的原因。结果显示凹唇壁蜂使每个角果种子粒数增加 11.48%。9:00-10:00、12:00-13:00 是凹唇壁蜂频繁出巢采集阶段，可能与此时田间温度较高，适宜壁蜂活动有关。另外，我们观察发现了 3 种停留时间长度明显不同的在巢中停留行为：长停留型的停留时间达 1.64 h，中停留型的停留时间为 16.21 min，而短停留型的停留时间仅为 2.58 min，这可能与凹唇壁蜂从事不同的活动有关，凹唇壁蜂在巢室的活动包括运送和建筑，我们推测长时间在巢室停留行为可能是在制作花粉团、制作土室、产卵等，而短时间停留可能是因为凹唇壁蜂运送花粉、花蜜或泥土。

油菜分布广泛，是我国四大油料作物之一，也是非常重要的蜜源植物，具有较高的经济价值。在油菜的农业生产过程中，传粉昆虫对油菜的产量和品质起着很大的作用。但随着集约化农业的发展和各种化学农药、杀虫剂的滥用，昆虫的栖息环境受到破坏，天敌和传粉昆虫等益虫的物种丰富度急剧减少，昆虫的生存和繁衍面临着极大的威胁。因此人为增加生境中蜂类授粉，显得更为重要（石元元等，2009）。人工放蜂是解决由于授粉昆虫数量不足导致的油菜授粉不良产量、品质下降的一个主要措施（周丹银等，2010）。研究结果显示，凹唇壁蜂授粉区的油菜单角果重、结角果率、每角果粒数均高于隔离授粉区，虽然凹唇壁蜂授粉区和隔离授粉区的油菜在单角果鲜重、结角果率上没有显著差异，但凹唇壁蜂授粉区的油菜每角果粒数显著高于隔离授粉区，显然在油菜花期适量引入凹唇壁蜂可以达到提高产量的效果。这是凹唇壁蜂能使油菜提高产量的主要原因。油菜花两性，花瓣 4 枚，呈十字形排列，雄蕊常 6 枚，雌蕊子房位置靠上。

凹唇壁蜂特殊的访花方式与油菜花的特殊结构吻合程度高，这使得授粉更充分。凹唇壁蜂是一种优秀的本土传粉昆虫资源，其活动周期与油菜花期相吻合，适用度高（咸拴狮等，2015）。

授粉功能量反映了作物对授粉昆虫的需求量情况，而评估昆虫对作物的授粉服务价值便于人们更直观地了解并掌握昆虫授粉的经济价值及经济意义。通过评价凹唇壁蜂对油菜的授粉功能量，可以了解凹唇壁蜂对油菜产量的生物学和生态学效应，也可以反映出油菜对凹唇壁蜂授粉的需求量情况。凹唇壁蜂授粉功能量越大，对凹唇壁蜂的需要越大。全国各省凹唇壁蜂对油菜的授粉服务价值和功能量变化趋势相似，结果反映出湖北、四川、湖南三个省的油菜对凹唇壁蜂授粉的依赖程度高。这也与此三省油菜种植面积有关，此三省为油菜大面积种植区域。油菜种植的面积越大，凹唇壁蜂的授粉作用则越显重要。分析已调查省份的数据，凹唇壁蜂在油菜生产中传粉服务总价值约 194.102 亿元。但由于缺少部分省份的数据，故我国凹唇壁蜂在油菜上的传粉服务价值远大于这个估计值，凹唇壁蜂授粉经济价值巨大。

总之，凹唇壁蜂为油菜授粉显得极为重要，投入壁蜂授粉既能实现增产的目的、实现经济价值、降低生产成本、满足人类需要，又能利用本土传粉昆虫资源恢复生态环境、维持自然界生态平衡。因此我们应该重视凹唇壁蜂的授粉在油菜生产中的应用。但凹唇壁蜂对其他作物有无授粉优势，仍需要进一步研究。

参考文献 (References)

Cao YB, Zhou XH, Ye BH, Li LL, Lu ZB, Xu H, Li WQ, Yu Y, Men XY, 2017. Restriction factors to *Osmia excavata* Alfken populations in apple orchards of Shandong Province. *Chinese Journal of Applied Entomology,* 54(4): 652–659. [曹衍斌, 周仙红, 叶保华, 李丽莉, 卢增斌, 徐衡, 李文强, 于毅, 门兴元, 2017. 山东苹果园凹唇壁蜂种群的制约因子分析. 应用昆虫学报, 54(4): 652–659.]

Guo Y, Shao YQ, 2008. Increasing yield mechanism of bee pollination. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, (3): 42–44. [郭媛, 邵有全, 2008. 蜜蜂授粉的增产机理. 山西农业科学, (3): 42–44.]

Klein AM, Vaissiere BE, Cane JH, Steffan-Dewenter I, Cunningham SA, Kremen C, Tscharntke T, 2007. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society B*, 274(1608): 303–313.

Li HY, 2012. Study on the economic value of honeybee pollination in China. Doctoral dissertation. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University. [李海燕, 2012. 中国蜜蜂授粉的经济价值研究. 博士学位论文. 福州: 福建农林大学].

Liu PF, Wu J, Li HY, Lin SW, 2011. Economic evaluation of pollination of agricultural bees in China. *Chinese Scientia Agricultura Sinica*, 44(24): 5117–5123. [刘朋飞, 吴杰, 李海燕, 林素文, 2011. 中国农业蜜蜂授粉的经济价值评估. 中国农业科学, 44(24): 5117–5123.]

Matsumoto S, Maejima T, 2010. Several new aspects of the foraging behavior of *Osmia cornifrons* in an apple orchard. *Psyche*, doi: 10. 1155/2010/384371.

Morse RA, Calderone NW, 2000. The value of honey bees as pollinators of U. S. crops in 2000. *Bee Culture*, (128): 115.

Ollerton J, Winfree R, Tarrant S, 2011. How many flowering plants are pollinated by animals? *Oikos*, 120(3): 321–326.

Shi YY, Guan C, Zeng ZJ, An JD, Luo SD, 2009. Effect and mechanism of pollination and increasing yield of rape. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 31(6): 994–999, 1005. [石元元, 管翠, 曾志将, 安建东, 罗术东, 2009. 蜜蜂为油菜授粉增产效果及机理研究. 江西农业大学学报, 31(6): 994–999, 1005.]

Xian SS, Du CF, Fan JC, Ma DJ, Xian LX, 2015. Study on the biological characteristics and its application in rapeseed hybridization. *Journal of Agricultural Science*, 5(4): 44–47. [咸拴狮, 杜春芳, 范建春, 马冬菊, 咸丽霞, 2015. 壁蜂生物学特性及其在油菜杂交制种中的应用研究. 农学学报, 5(4): 44–47.]

Yang JL, Gu XH, Wang X, Zai NTB, Jiao ZW, 2015. Pollination behavior and pollination effect of two species of honeybee on strawberry in Xinjiang greenhouse. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 43(5): 162–164. [杨佳林, 顾向红, 王霞, 再那提布, 焦子伟, 2015. 2 种蜜蜂对新疆温室草莓的授粉行为和授粉效果. 江苏农业科学, 43(5): 162–164.]

Zhou DY, Jian SF, Liu YQ, Huang YQ, Gu ZT, Kuang HO, Wu SJ, Chen FQ, Dong K, He SY, 2010. Preliminary study on pollination effect of bee for rape. *Journal of Bee*, 30(1): 3–5. [周丹银, 简绍方, 刘意秋, 黄永权, 顾忠堂, 匡海鸥, 吴水菊, 陈凤琼, 董坤, 和绍禹, 2010. 蜜蜂为油菜授粉效果初步研究. 蜜蜂杂志, 30(1): 3–5.]

Zhou WR, 2002. New Technology of *Osmia* Pollination to Fruit Tree. Beijing: The Jindun Publishing House. 25–28. [周伟儒, 2002. 果树壁蜂授粉新技术. 北京: 金盾出版社. 25–28.]